



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

**LASSI PIRTTINEN**  
**URBAN MINING OSANA KAUPUNKIEN RAKENTEIDEN**  
**MATERIAALIEN HYÖTYKÄYTTÖÄ**

Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laitos

Tarkastajat: Jukka Rintala  
Marja Palmroth

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

**PIRTTINEN, LASSI:** Urban mining osana kaupunkien rakenteiden materiaalien hyötykäyttöä

Urban mining and material utilization of urban structures

Kandidaatintyö, 25 sivua

Heinäkuu 2018

Pääaine: Bio- ja ympäristötekniikka

Tarkastaja: Jukka Rintala, Marja Palmroth

Tässä työssä käsitellään urban mining -konseptin soveltamista osaksi kaupunkialueiden rakennusten ja rakenteiden materiaalien hyötykäyttöä. Urban mining on konsepti, jossa ihmisen toiminnan seurauksena syntyneet materiaalivarastot, kuten rakennukset, hyödynnetään raaka-ainetuotantoon. Urban mining muistuttaaakin periaatteiltaan sekä tavanomaista kaivostoimintaa että perinteistä kierrättämistä.

Jotta jonkin alueen rakennuskantaa voidaan hyödyntää materiaalina, on sen sisältämät materiaalit tunnettava. Tähän tarkasteluun voidaan hyödyntää niin materiaalivarasto- kuin materiaalivirta-analyysejäkin. Näiden analyysien avulla saadaan arvioita siitä, millaisia materiaalikoostumuksia rakenteet sisältävät.

Pääasiassa länsimaiset kaupungit noudattavat hyvin samankaltaista materiaalijakaumaa: mineraalijae 88–95 %, puu 0–6% ja metalli 2–9%. Näiden lisäksi muut jakeet täydentävät jakaumat. Tällaisesta materiaalivirrasta laadukkaiden raaka-aineiden tuottaminen on teknisesti hyvin haastavaan ja siksi siihen tarvitaankin monia eri erottelumenetelmiä. Erottelumenetelmiä on kehitetty laajasti ja tässä työssä keskitytään yhteen esimerkkiprosessiin, jossa päätavoitteena on tuottaa betonin runkoaineeksi kelpaavaa hienoainesta ja erotella puu sekä metalli omiksi hyötykäytettäviksi jakeikseen.

## SISÄLLYS

|   |    |
|---|----|
| Tiivistelmä .....   | II |
| 1. Johdanto .....   | 1  |
| 2. Urban mining -konsepti.....  | 3  |
| 2.2 Urban mining ja kiertotalous.....                                 | 4  |
| 2.3 Rakennus- ja purkujätteen ongelmat urban mining -konseptissa..... | 5  |
| 3. Kaupunkialueiden rakenteiden urban mining -potentiaali .....       | 6  |
| 3.1 Potentiaalin arvioiminen materiaalivirta-analyysin avulla .....   | 6  |
| 3.2 Potentiaalin arvioiminen materiaalivarastoanalyysin avulla.....   | 8  |
| 3.3 Rakenteiden sisältämät materiaalit.....                           | 9  |
| 4. Rakenteiden sisältämien materiaalien hyödyntäminen .....           | 13 |
| 4.1 Rakenteiden purkaminen ja sen vaikutukset.....                    | 13 |
| 4.2 Purku- ja rakennusjätteen erottelumenetelmät .....                | 14 |
| 5. Yhteenveto ja johtopäätökset .....                                 | 20 |
| Lähteet.....  | 22 |



# 1. JOHDANTO

Nyky-yhteiskunnassa raaka-ainekulutus on kasvanut viimeisen vuosisadan aikana kahdeksankertaiseksi ja uusiutumattomien raaka-aineiden osuus kaikesta raaka-aineesta on lähes 70 %. Suurin syy raaka-ainekulutuksen kasvuun on väestönkasvu ja kehittyvien maiden teollistuminen. Tulevaisuudessa nämä maat tulevat edelleen lisäämään kulutuksen kasvua kaksinkertaisesti teollistuneihin maihin verrattuna niiden elintason noustessa. (Krausmann et al. 2009) Tämä on jo nyt aiheuttanut ongelmia esimerkiksi ilmastomuutoksen ja jätevirtojen kasvun muodossa. Lisäksi iso osa maankuoren sisältämistä raaka-aineista, kuten öljystä ja joistakin metalleista, on jo tai tullaan lähitulevaisuudessa hyödyntämään (Wouters & Bol 2009). Näistä syistä johtuen on tärkeää pystyä tulevaisuudessa vastaamaan kasvavaan kulutukseen niin raaka-aineiden, ympäristövaikutusten kuin jätevirtojen hallinnankin kannalta.

Nykyinen talousajattelumme perustuu niin sanottuun lineaariseen talouteen, jossa tuotteet pyritään oletusarvoisesti hävittämään niiden käyttöiän loputtua (Arora et al. 2017, Cossu & Williams 2015). Tästä johtuen raaka-aineita on kertynyt suuria määriä esimerkiksi kaatopaikoille sekä hylättyyn rakennus- ja infrastruktuurikantaan. Tulevaisuudessa onkin ensiarvoisen tärkeää siirtyä kohti kiertotalousajattelua, jossa materiaalien arvo pyritään säilyttämään tuotteen elinkaaren päättyessäkin. Käytännössä tämä siis vähentää loppusijoitettavan materiaalin määrää ja kasvattaa jättemateriaalien hyötykäyttöä. Jätevirtojen muuttaminen raaka-aineiksi auttaa hallitsemaan tietysti kasvavien jätevirtojen ja ehtyvien luonnollisten raaka-aineiden aiheuttamia ongelmia, mutta myös ympäristöongelmia. Tähän ajatusmalliin perustuu myös urban mining -konsepti.

Urban mining -termillä tarkoitetaan ihmisen toiminnan seurauksena syntyneen materiaalivaraston hyödyntämistä uudelleen raaka-aineeksi teollisuuden käyttöön (Cossu 2013). Tällainen materiaalivarasto voi olla esimerkiksi kaatopaikka tai kierrätysmielessä kerätty elektroniikkajäte. Cossu ja Williams (2015) pyrkivät kuitenkin erottamaan urban mining -konseptin perinteisestä kierrättämisestä, jossa materiaalit hyödynnetään ennen kuin ne kerkeävät varastoitua. Kokonaisuudessaan ajattelumalli on osa suurempaa materiaalien hyötykäyttökokonaisuutta ja linkittyy tätä kautta myös jätteen minimoinnin tavoitteluun sekä lopulta kiertotalousajatteluun.

Sen lisäksi että materiaaleja varastoitunut hylättyyn rakennus- ja infrastruktuurikantaan, niitä on vielä enemmän käytössä olevassa rakennus- ja infrastruktuurikannassa. Nykyään yhä useammin uudet rakennushankkeet suunnitellaan kaupunkialueelle siten, että hanke edellyttää vanhojen rakennusten ja rakenteiden purkamista. Tällaisessa tilanteessa urban mining -näkökulmasta purkukohde on materiaalivarasto, joka oikein hyödynnettynä mahdollistaa pienemmät ympäristövaikutukset sekä antaa projektille taloudellista

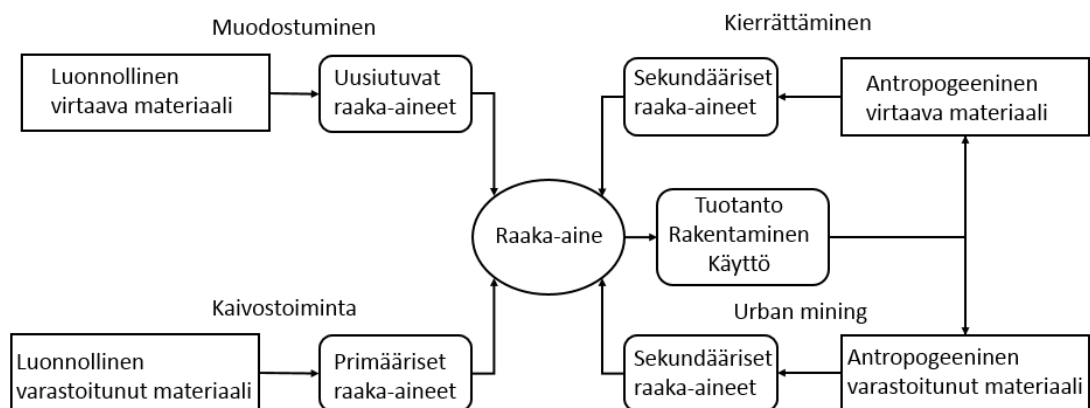
joustavuutta. Potentiaali tämän kaltaiselle toiminnalle on suuri, sillä materiaalmäärät, jotka liittyvät rakentamiseen sekä purkamiseen eivät ole pieniä verrattuna kaikkeen tuotettuun jätteeseen. EU28-alueella vuonna 2014 rakennus- ja purkamisjäte (engl. construction & demolition waste, yleisesti lyhennetty C&D waste tai CDW) oli suurin yksittäinen jätevirta ja muodosti 34 % kaikesta alueella syntyvästä jätteestä (Eurostat 2017). Tässä työssä on rajauduttu kuitenkin vain osaan rakennus- ja purkujätteessä esiintyvistä materiaalista. Rajausta on toteutettu siten, että ei-metallisia mineraalimateriaaleja, puuta sekä metallia on käsitelty niiden urban mining -raaka-ainetuotannon osalta ja tämän lisäksi tilastoissa on esitetty myös pienemmät jakeet pääasiassa yhteen laskettuina. Maa-ainesta ei ole käsitelty ollenkaan eikä sitä myöskään esitetä tilastoissa. Tällöin työssä käsiteltävän rakennus- ja purkumateriaalivirran suuruudeksi kaikesta EU28-alueella tuotetusta jätteestä muodostuu 13 %. Kyseessä on siis varsin merkittävä asia niin jätehuollon kuin raaka-ainetuotannonkin näkökulmasta.

Tässä työssä on pyritty selvittämään, miten kaupunkialueiden rakenteiden sisältämät materiaalit pystytään arvioimaan määrällisesti ja hyötykäyttämään eli millä tavoin urban mining -konsepti toimii.

Luvussa 2 on esitetty mitä on urban mining ja miten se sijoittuu osaksi suurempiin kokonaisuuksiin kuten kiertotalous ja jätteenkäsittelyn etusijajärjestys sekä miten konsepti sijoittuu rakennus- ja purkamisjätteeseen nähden. Luvussa 3 tarkastellaan alueen urban mining -potentiaalin arvioimiseen käytettäviä menetelmiä ja esitetään muutamia erilaisia tuloksia. Luvussa 4 esitetään, pääasiassa esimerkkiprosessin avulla, miten materiaalit voitaisiin hyödyntää rakennus- ja purkujätevirrasta. Luvussa 5 on koottu tärkeimmät johtopäätökset yhteen.

## 2. URBAN MINING -KONSEPTI

Termi urban mining on suhteellisen uusi käsite, sitä on käytetty varsin laajasti kuvaamaan kierrättämistä eri muodoissa eikä terminologia ole ollut täysin yhtenäinen eri tutkimusten välillä (Brunner 2011, Cossu & Williams 2015, Halada & Nakamura 2014). Kaikille määritelmille on kuitenkin yhteistä se, että hyödynnettävä materiaali on ihmisen tuottamaa eli antropogeenista. Sen sijaan se, mikä osa antropogeenisesta materiaalista lasketaan urban mining -konseptilla hyödynnettäväksi, eroaa välillä merkittävästikin. Tässä työssä termillä tarkoitetaan ihmisen toiminnan seurauksena muodostuneen resurssiesiintymän uudelleenhyödyntämistä. Tavanomaisesta kaivostoiminnasta se siis eroaa siten, että ”kaivos” ei ole luonnollinen, vaan materiaalit ovat kerääntyneet yhteen ihmisen toimesta. Kierrättämiseen nähden ero puolestaan on se, että toiminnan kohteena oleva materiaali ei ole niin sanotusti virtaava vaan varastoitunut. (Cossu & Williams 2015) Virtaavia ja varastoituneita materiaaleja on vaikea erottaa määritelmän tasolla toisistaan (Lederer et al. 2016). Virtaavalla materiaalilla tarkoitetaan sellaista resurssia, jota ikään kuin muodostuu jatkuvasti. Esimerkiksi, kun tuotetta valmistetaan, se päättyy lopulta jätevirtaan, josta se ideaalissa tilanteessa käytetään uudestaan raaka-aineena. Mikäli kyseinen tuote loppusijoitetaan kaatopaikalle, muuttuu se tällöin varastoituneeksi materiaaliksi. Lisäksi virtaavan materiaalin hyödyntämisen voidaan ajatella muistuttavan enemmän tuotantolinjamallia, kun sitä verrataan projektimaisempaan varastoituneen materiaalin hyödyntämiseen. Esimerkiksi elektroniikkajätettä, joka kerätään erikseen, voidaan pitää virtaavana materiaalina. Kaiken kaikkiaan materiaalit voidaan ottaa raaka-ainekäyttöön neljällä eri tavalla (kuva 1).

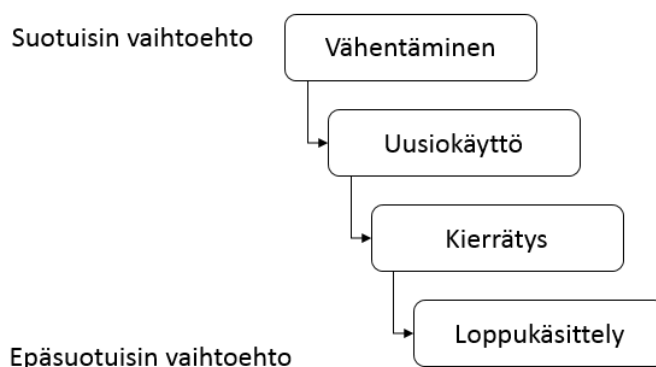


**Kuva 1.** Raaka-ainetuotanto kuvattuna eri alkuperien sekä muodostumistapojen avulla. Mukailten Cossu & Williams 2015.

Kuvassa 1 nähdään, kuinka varastoituneet ja virtaavat materiaalit eroavat toisistaan sekä kuinka urban mining on yksi neljästä raaka-aineiden tuotantoreitistä. Kuten huomataan urban mining -konsepti sisältää samankaltaisuuksia sekä kierrättämisen että tavanomaisesta kaivostoiminnan kanssa.

## 2.2 Urban mining ja kiertotalous

Kuvan 1 oikealle puolelle muodostuu suljettu piiri. Tämän piirin voidaan ajatella olevan kiertotalousajattelun perusta, jossa raaka-aineista valmistetut tuotteet palaavat elinkaarensa päätteeksi takaisin raaka-aineiksi. Samasta kuvasta huomataan, että urban mining -konsepti on melko keskeisessä asemassa tällaisessa ajattelussa, sillä se muodostaa toisen paluureiteistä. Kiertotalousajattelussa pyritään usein toteuttamaan 3R-periaatetta (engl. reduce, reuse, recycle) eli jätteenkäsittelyn etusijajärjestystä. Lähestytään kiertotalousajattelua tämän periaatteen avulla, ja katsotaan, miten urban mining liittyy kuhunkin tasoon.



**Kuva 2.** Jätteenkäsittelyn etusijajärjestys eli niin sanottu 3R-periaate (engl. reduce, reuse, recycle). Mukaillen Ghafourian et al. 2016.

Etusijajärjestys koostuu kolmesta hierarkkisesta tasosta, joista ensimmäinen on ympäristön kannalta suotuisin ja sitä pyritään noudattamaan ennen seuraavalle siirtymistä (kuva 2) (Ghafourian et al. 2016, Ympäristöministeriö 2017).

Ensimmäisenä tasona jätteenkäsittelyssä on jätteen syntymisen vähentäminen (engl. reduce), mikä ei varsinaisesti ole vielä jätteenkäsittelyä, vaan enemmänkin ennaltaehkäisevää toimintaa. Taso ei ole myöskään merkittäväällä tavalla liity urban mining -konseptiin. Mikäli jätettä kuitenkin muodostuu, materiaalit pyritään joko uusiokäyttämään (engl. reuse) sellaisenaan tai ne valmistellaan uusiokäyttöä varten (Ympäristöministeriö 2017). Uusiokäytön voidaan ajatella olevan myös osa urban mining -konseptia, sillä jossain tapauksissa materiaalit voidaan käyttää sellaisenaan, tai käsittelyn jälkeen, samaan tarkoitukseen. Rakennus- ja purkujätteen osalta hyvänä esimerkkinä voidaan pitää pilaantunutta maa-ainesta, jota voidaan käyttää sellaisenaan kaatopaikan maisemoinnissa. Pääosin urban mining kuitenkin keskittyy kierrätystasolle (engl.



recycle). Sillä tarkoitetaan jätteen hyödyntämistä ensisijaisesti materiaalina ja toissijaisesti energiana (Ympäristöministeriö 2017). Juuri ihmisen toiminnan seurauksena muodostuneen resurssivaraston, eli jätteen, uudelleen raaka-aineena hyödyntäminenhan oli urban mining -termin määritelmä.

## **2.3 Rakennus- ja purkujätteen ongelmat urban mining -konseptissa**

Rakennus- ja purkujätteeksi luokitellaan rakentamisesta, korjausrakentamisesta sekä purkamisesta syntyvät materiaalit (Eurostat 2010). Verraten kuvaan 1, rakentaminen on siis yksi tapa, jolla raaka-aine lopulta päätyy varastoituneeksi materiaaliksi ja täten erottaa sen kierrätettävistä materiaaleista.

Urban mining käsittäisi tarkasti ottaen juuri purkamisesta ja korjausrakentamisesta, vanhojen rakenteiden purkamisen osalta syntyvät materiaalivirrat eli osa tästä materiaalivirrasta täytyisi määritelmän mukaan käsitellä virtaavana materiaalina. Esimerkkinä tästä on betonia valettaessa käytetyt puiset muotit, jotka eivät varsinaisesti varastoidu rakenteisiin vaan ne ohjataan nopeasti jätevirtaan. Koska monissa tilastoissa (Eurostat, Tilastokeskus) sekä laissa rakennus- ja purkujäte ilmoitetaan samassa yhteydessä, käsitellään tässä työssä näitä yhtenä jätevirtana siten, että niiden ajatellaan olevan varastoituneita materiaaleja. Rakennus- ja purkujäte on myös näkyvin ja käytännönläheisin tapa päästä käsiksi rakennusten ja rakenteiden sisältämiin materiaaleihin.

### **3. KAUPUNKIALUEIDEN RAKENTEIDEN URBAN MINING -POTENTIAALI**

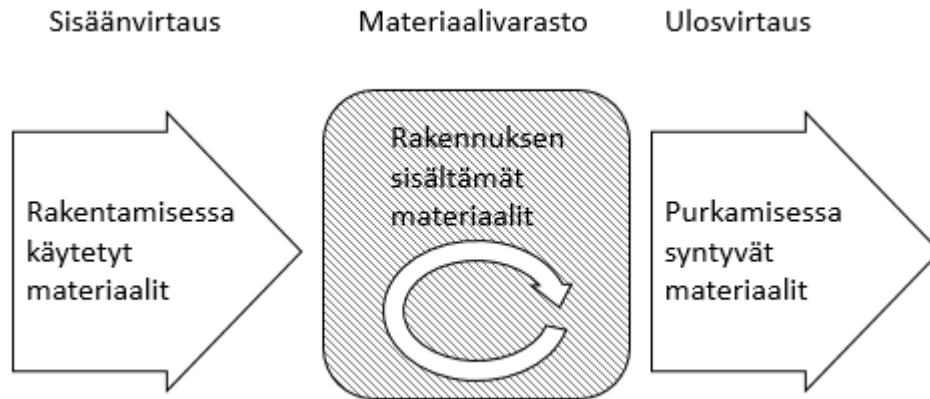
Tavanomainen kaivostoiminta sisältää viisi päävaihetta, jotka ovat malminetsintä, löydöksen yksityiskohtaiset tutkimukset, kaivoksen perustaminen, aktiivinen toiminta ja jälkihoito (Hartman & Mutmanský 2002). Sheng et al. (2018) esittävät, että näitä samoja periaatteita voidaan seurata myös urban mining -konseptissa, pois lukien jälkihoito, johon he eivät ota kantaa. Jälkihoidolla tarkoitetaan kaivoksen toiminnan jälkeen kaivosalueen ja sen ympäristön palauttamista toimintaa edeltäneeseen tilaan. Myöskään tässä työssä ei käsitellä jälkihoitoa, mutta voidaan todeta, että koko urban mining -konseptin voi nähdä eräänlaisena jälkihoitona.

Käsitellään nyt viidestä päävaiheesta kahta ensimmäistä. Samalla tavoin kuin perinteisessä kaivostoiminnassa myös urban mining -konseptissa esiintymän etsintä ja arviointi kulkevat käsi kädessä (Lederer et al. 2016). Esiintymän etsinnän tarkoituksena on joko löytää alue, jossa on tiettyä raaka-ainetta tai raaka-ainetta tietyltä alueelta. Näitä kahta lähestymistapaa kutsutaan paikkakohtaiseksi ja raaka-ainekohtaiseksi lähestymistavaksi (Hartman & Mutmanský 2002). Myös urban mining voidaan toteuttaa esiintymän etsinnän kannalta samoilla periaatteilla (Lederer et al. 2016). Tämän jälkeen siirrytään esiintymän arviointiin, joka toteutetaan urban mining -konseptissa arvioimalla materiaaliesiintymän potentiaalia (Lederer et al. 2016).

Kaupunkialueiden urban mining -potentiaalia voidaan arvioida kahdella tapaa, jotka linkittyvät toisiinsa. Voidaan yrittää arvioida rakenteiden sisältämiä materiaalivarastoja tai voidaan keskittyä tarkastelemaan materiaalivirtoja, jotka syntyvät rakentamisesta sekä purkamisesta (Augiseau & Barles 2017, Sheng et al. 2018). Näiden kahden hyvin toistensa kaltaisen lähestymistavan erona on tutkimuksen kohde. Toinen pyrkii selvittämään materiaalivirtoja ja toinen materiaalivarastoja.

#### **3.1 Potentiaalin arvioiminen materiaalivirta-analyysin avulla**

Urban mining -potentiaalia voidaan arvioida perustuen materiaalivirtoihin. Tätä menetelmää kutsutaan materiaalivirta-analyysiksi (engl. material flow analysis lyhennettynä MFA). Materiaalivirta-analyysi on perusidealtaan hyvin yksinkertainen (kuva 3).



**Kuva 3.** Materiaalivirta-analyysin yksinkertaistettu pääperiaate.

Materiaalivaraston sisältämät materiaalit voidaan laskea helposti virtausten erotuksena, mikäli virtaukset tunnetaan (kuva 3). Materiaalivirta-analyysissä materiaalivarasto ei ole kiinnostuksen kohde ja sen sisäiset prosessit pyritään ohittamaan keskittyen sisään- ja ulosvirtauksiin. Analyysi voidaan kuitenkin toteuttaa neljällä erilaisella tarkastelulla, jossa voidaan tehdä kaksi valintaa, joissa kummassakin on kaksi toisilleen vaihtoehtoista tarkastelua. Nämä kaksi paria ovat alhaalta ylös -tai ylhäältä alas -tarkastelu sekä staattinen tai dynaaminen tarkastelu. (Augiseau & Barles 2017, Birat et al. 2014)

Alhaalta ylös -tarkastelussa pyritään ensin määrittelemään prosessi, jossa valittu materiaali kulkee. Tämä prosessi käsittää materiaalin primääriseen hankkimisen, sen muuttamisen tuotteeksi, käyttämisen sekä palauttamisen takaisin raaka-aineeksi. Tämän pohjalta voidaan arvioida käytössä olevan kannan määrä, jonka avulla pyritään määrittämään kokonaismateriaalivirtoja. Brunner & Rechberger (2005) määrittelivät oman näkemyksensä suorittaa materiaalivirta-analyysin näin ja Augiseau & Barles (2017) sekä Birat et al. (2014) näkevät, että tämä on juurikin alhaalta ylös -tarkastelu.

Vastakohtana alhaalta ylös -tarkastelulle on ylhäältä alas -tarkastelu (Augiseau & Barles 2017, Birat et al. 2014). Tässä lähestymisessä pyritään ensin määrittämään materiaalivirrat. Toisin kuin alhaalta ylös -tarkastelussa, ylhäältä alas -tarkastelu ei pyri tarkasti selvittämään prosessin sisäisiä systeemeitä, vaan keskittyy ainoastaan materiaalien ulos- ja sisäänvirtauksiin. Tällöin se on huomattavasti yksinkertaisempi kuin alhaalta ylös -tarkastelu. Menetelmä perustuu Eurostatin (2001) yhteiskunnan tai kansantalouden materiaalivirta-analyysiin, mutta se soveltuu myös alueelliseen tarkasteluun, mikäli samat tiedot ovat saatavilla alueellisella tasolla (Barles 2009).

Toinen toisensa pois sulkeva pari on staattinen ja dynaaminen tarkastelu. Staattisella tarkastelulla tarkoitetaan tietyn ajanjakson aikana tehtyä tarkastelua. Yleensä staattisessa tarkastelussa tarkasteltavana ajanjaksona on esimerkiksi yksi vuosi. Tältä ajan jaksolta tarkastellaan sisään tulleet ja ulos lähteneet virrat. Dynaamisessa tarkastelussa

keskitytään puolestaan pidempään ajanjaksoon, kuten muutamaan vuosikymmeneen. Tällainen tarkastelu staattisesti tehtynä vaatisi suuren määrän työtä. Tämän takia dynaamisessa tarkastelussa ulosvirtaukset pyritään arvioimaan sisäänvirtausten tai materiaalivarastojen ennustetun kasvunopeuden sekä materiaalivarastojen, esimerkiksi rakennusten, eliniän perusteella. Riippuen lähestymistavasta, tällaisia malleja kutsutaan joko virtaus- tai varastovetoiseksi malleiksi. (Birat et al. 2014, Augiseau & Barles 2017)

### **3.2 Potentiaalin arvioiminen materiaalivarastoanalyysin avulla**

Urban mining -potentiaalia voidaan arvioida rakenteiden sisältämien materiaalien analysoinnin avulla. Vaikka materiaalivirta-analyysin yksi päättarkoituksista on pyrkiä määrittelemään sisään- ja ulosvirtausten erotus eli materiaalivarasto, voidaan materiaalivarastoanalyysi (engl. material stock analysis lyhennettynä MSA) silti käsittää omaksi kokonaisuudekseen. Tämä lähestymistapa muistuttaa enemmän perinteisen kaivostoiminnan kahta ensimmäistä päävaihetta, sillä yhdistettynä esimerkiksi neliulotteiseen paikkatietojärjestelmään (engl. four-dimensional geographical information system lyhennettynä 4D-GIS), se tuo esiin korkean materiaalipitoisuuden omaavia alueita (Tanikawa & Hashimoto 2009).

Samoin kuin materiaalivirta-analyysissä myös materiaalivarastoanalyysissä voidaan erottaa ylhäältä alas -ja alhaalta ylös -tarkastelut (Augiseau & Barles 2017). Alhaalta ylös -tarkastelussa pyritään materiaalivarastot jakamaan kategorioihin, jonka jälkeen määritetään kunkin kategorian materiaalisuhteet. Rakennusten tapauksessa ensin jaotellaan rakennukset esimerkiksi käyttötavan mukaan, jonka jälkeen määritetään materiaalisuhteet esimerkiksi yksikössä tonnia per m<sup>2</sup>. (Augiseau & Barles 2017, Cheng et al. 2018). Lisäksi tällainen tarkastelu on aina staattinen (Augiseau & Barles 2017).

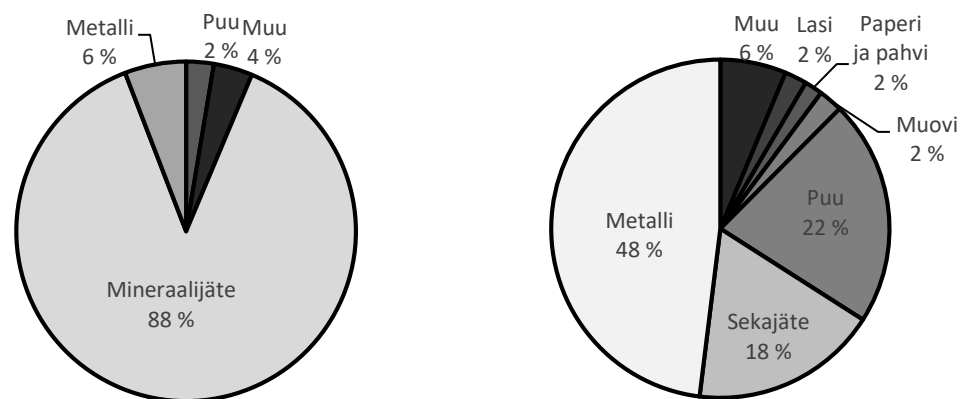
Materiaalivarastoanalyysin ylhäältä alas -tarkastelussa, samoin kuin materiaalivirta-analyysissä, pyritään määrittämään sisään- ja ulosvirtaukset. Näiden avulla saadaan selville kerääntynyt varasto. Kuten huomataan, materiaalivarastoanalyysi on hyvin lähellä materiaalivirta-analyysiä, ja esimerkiksi ylhäältä alas materiaalivarastoanalyysi on oikeastaan sama asia kuin dynaaminen varastovetoinen materiaalivirta-analyysi. Ero muodostuu vain siitä, mitä tutkimuksella on lähdetty selvittämään. (Augiseau & Barles 2017)

Kaupunkialueen rakenteiden urban mining -potentiaalia selvittäessä on tärkeitä saada selville juuri rakenteisiin varastoituneen materiaalin määrä, johon materiaalivarastoanalyysin yksiselitteisesti pyrkii. Kuitenkin, kuten tavanomaisessakin kaivostoiminnassa, myös urban mining vaatii, rakennusten tapauksessa, lisäksi tiedon materiaalin sijainnista sekä sen hyödynnettävyydestä (Hartman ja Mutmanský 2002, Tanikawa & Hashimoto 2009, Cheng et al. 2018). Tämän vuoksi Tanikawa & Hashimoto

(2009) esittävät materiaalivarastoanalyysin kanssa hyödynnettäväksi neliulotteista paikkatietojärjestelmää, joka ei ainoastaan sido materiaalivarastoa tiettyyn paikkaan, vaan myös mahdollistaa ajallisen arvion, koska varasto olisi hyödynnettävissä. Cheng et al. (2018) vievät ajatusta vielä eteenpäin yhdistämällä siihen niin kutsutun hot spot -analyysin. Heidän mukaansa hot spot -analyysiä käytetään usein sosiologisissa tieteissä ja se ilmaisee ilmiön kykyä muodostaa alueellisia keskittymiä. Samaa analyysiä voisi heidän mielestään käyttää myös kaupunkirakenteiden urban mining kartoituksessa, sillä kaupunkirakentamisella on taipumusta muodostaa paikkasidonnaisia keskittymiä, joissa on samaan aikaan rakennettuja taloja ja infrarakenteita. Tällä tavoin löydetään keskittymiä, joissa on paljon vanhoja rakenteita, jolloin kyetään tehokkaampaan materiaalien talteenottoon.

### 3.3 Rakenteiden sisältämät materiaalit

Tarkastellaan millaisia materiaaliosuuksia kaupunkialueiden rakenteet sisältävät. Lähdetään liikkeelle tarkastelemalla EU28-alueella vuonna 2014 tuotettua rakennus- ja purkamisjätettä ilman maajätettä (kuva 4). Tarkastellaan tämän jälkeen kolmea muuta esimerkkiä (kuvat 5–8). Kuvien 5–8 tutkimuksissa materiaalivarasto on määritetty alhaalta ylös materiaalivarastoanalyysillä. Sen sijaan, kuvassa 4 ei ole suoritettu varsinaista materiaalivarasto- tai materiaalivirta-analyysiä, vaan siinä esitetään vain yksi materiaalivirta, ulosvirtaus. Lisäksi materiaalit luokiteltiin kuvien 5–8 tutkimuksissa eritavoin, jonka takia ne on ryhmitelty saatavilla olleiden tietojen perusteella vastaamaan paremmin Euroopan unionin EWC-järjestelmää. Tällöin niiden keskinäinen vertailu ja vertaaminen kuvaan 4 ovat helpompi toteuttaa.



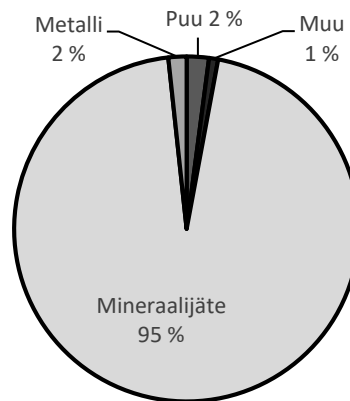
**Kuva 4.** Oikealla EU-28 -alueen rakennus- ja purkujätteet ilman maa- ja mineraalijätteitä sekä vasemmalla ilman maajätettä. (Eurostat 2017)

Huomattavin materiaalivirta on mineraalijäte (EWC 12.1) (kuva 4). Tämä jätelaji sisältää betonin, tiilet, asfaltin sekä kipsilevyn (Eurostat 2010). Koska mineraalijätteen prosentuaalinen osuus on niin suuri, on esitetty myös jäljelle jäävä 12 % tarkemmin

erillisessä diagrammissa. Tästä diagrammista nähdään paremmin toiseksi ja kolmanneksi suurimmat materiaalivirrat, jotka ovat metalli ja puu.

Kuvasta saadaan karkea käsitys kaupunkirakenteiden materiaalivarastojen koostumuksesta. Kuitenkin, koska vain yksi materiaalivirta, ulosvirtaus, tunnetaan, ei varsinaisen materiaalivaraston materiaalimääristä saada yksiselitteistä tietoa. Lisäksi materiaalivirta sisältää myös rakentamisessa syntyvän jätteen, ei pelkästään purkamisjätettä. On myös muistettava, että tässä materiaalivirrassa näkyy purkamismateriaalien osalta pääasiassa vanha rakennuskanta, sillä materiaalien käyttö rakentamisessa on muuttunut ja tulee muuttumaan edelleen (Cheng et al. 2018).

Käsitellään seuraavaksi Wienin kaupungin rakennusten materiaalikoostumusta (kuva 5).

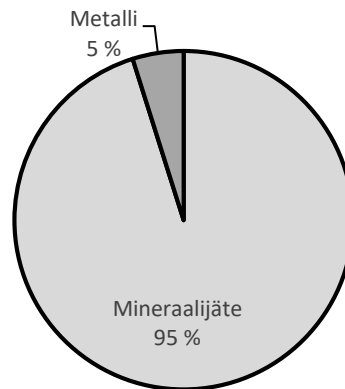


**Kuva 5.** Wienin kaupungin rakennusten materiaalikoostumus. Mukailten Kleemann et al. 2017.

Mineraalijätteen prosentuaalinen osuus on Wienin kaupungin rakennuskannassa suurempi kuin Eurostatin rakennus- ja purkujäte tilastossa (kuva 4), mikä vaikuttaa varsin loogiselta, sillä usein mineraalimateriaaleja, kuten betonia ja tiiltä, käytetään vain itse rakennukseen. Tällöin materiaalit varastoituvat ja näkyvät vasta purkamisen materiaalivirroissa, toisinkuin esimerkiksi puu, jota käytetään esimerkiksi pakkausmateriaalina ja betonin valamisen yhteydessä betonimuotteina. Tällöin tällaiset puumateriaalit eivät varastoidu rakennukseen, vaan ovat rakentamisessa syntyvää jätettä. Kuitenkin näyttäisi, että puun suhteellinen osuus on pysynyt samana ja metallien sekä muun jätteen osuus on pienentynyt. Muun jätteen osuuden pienentyminen saattaa johtua juurikin siitä, että osa siitä ei varastoidu rakennukseen, vaan se on rakennusjätettä. Metallien pienentynyt osuus saattaa puolestaan johtua Wienin rakennuskannan vanhuudesta verrattuna EU28-alueeseen, sillä metallien, etenkin teräksen/raudan, käyttö rakentamisessa on yleistynyt vasta 1950-luvulle tultaessa (Kleemman et al. 2017). Lisäksi tutkimuksessa kohteena ovat nimenomaan rakennusten materiaaliosuudet, jolloin

esimerkiksi rautateiden ja siirtoverkkojen sisältämät materiaalit eivät vaikuta tulokseen (Wallsten et al. 2013).

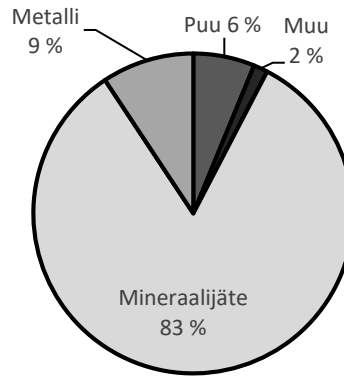
Toisena esimerkkinä on Wienin metroverkon materiaaliakoostumus (kuva 6). Tällä kertaa tarkasteltava kohde on hyvin spesifi, kun sitä verrataan aikaisempaan esimerkkiin Wienin koko kaupungin rakennusten materiaaliakoostumuksesta.



**Kuva 6.** Wienin metroverkon materiaaliakoostumus. Mukaillen Lederer et al. (2016)

Kun verrataan Wienin metroverkon (kuva 6) materiaaliakoostumusta kaupungin rakennusten materiaaliakoostumukseen, huomataan, että mineraalisten materiaalien prosentuaalinen osuus on yhtä suuri. Urban mining -potentiaalin kannalta on kuitenkin huomattava, että tutkimuksessa todettiin metroverkon mineraaliäiteen koostuvan lähes pelkästään betonista, verrattuna koko kaupungin materiaaliakoostumukseen, jossa tutkimusten mukaan mineraaliäite koostuu tasaisesti betonista, tiilestä ja laastista (Lederer et al. 2016, Kleemman et al. 2017). Odotettavasti myös metallin osuus on suurempi ja puun sekä muiden materiaalien osuudet ovat merkityksettömän pienet.

Tarkastellaan viimeisenä Saksan muuhun kuin asumiseen tarkoitettujen rakennusten (engl. non-domestic) eli esimerkiksi teollisuus- ja hallintorakennuksien sekä kauppakeskusten materiaaliakoostumuksia (kuva 7).



**Kuva 7.** Saksan muuhun kuin asumiskäyttöön tarkoitettujen rakennusten materiaaliakoostumus. Mukailen Ortlepp et al. 2016.

Jälleen, materiaaliakoostumus noudattaa hyvin samankaltaista koostumusta kuin aikaisemmatkin koostumukset. Merkittävänä erona nähdään metallin kasvanut osuus. Tämä johtuu erityisesti tutkittujen rakennusten tyypillisyydestä sisältää suuria avoimia tiloja, joiden rakentaminen edellyttää teräksisiä kannattelevia rakenteita (Ortlepp et al. 2016). Puun suuri osuus verrattuna Wienin kaupungin materiaaliakoostumukseen sekä EU28-alueen rakennus- ja purkujätevirtaan voi selittyä sillä, että puinen runko on vallitseva rakennustapa Saksan maatalouskäyttöön tarkoitetuissa rakennuksissa, jotka käsittävät 15% koko tutkimuksessa tarkastellusta lattia-alasta (Ortlepp et al. 2016).

Kuten edellä läpikäydyistä esimerkeistä nähdään, mineraalijae on suurin yksittäinen materiaaliavirta. Kuitenkin mineraalijakeen koostumuksessa on suuria eroja. Nämä erot vaikuttavat merkittävästi siihen kuinka helposti ja taloudellisesti materiaaliavirta voidaan hyödyntää ja millaiseen hyötykäyttöön se soveltuu. Metallit puolestaan ovat taloudellisesti kiinnostavin materiaali ja niiden hyödyntämisestä urban mining -konsepti on alun perinkin lähtenyt liikkeelle (Halada & Nakamura 2014). Metallin määrään vaikuttaa erityisesti rakenteen käyttötarkoitus ja ikä (Ortlepp et al. 2016, Kleemman et al. 2017). Puu puolestaan on ollut ennen 1950-lukua huomattavasti yleisempi rakennusmateriaali kuin nykyään (Kleemman et al. 2017). Lisäksi erityisesti maataloudessa, puu on runsaassa käytössä rakennusmateriaalina (Ortlepp et al. 2016). Käsiteltyjen esimerkkien pohjalta voidaan sanoa rakennusten koostuvan käytännössä näistä kolmesta jakeesta, muiden ollessa niin marginaalisia, että niiden hyödyntäminen on vaikeata. Tästä syystä niitä käsitellään jatkossa enemmän näiden kolmen jakeen epäpuhtauksina.

Lisäksi esimerkkien erilaisista materiaali koostumuksista voidaan todeta kappaleessa 3.2 mainittujen paikkatietojärjestelmän ja hotspot-analyysien olevan merkittävä edistysaskel urban mining -konseptin taloudellisuuden, materiaali tehokkuuden sekä ympäristövaikutusten kannalta.



## 4. RAKENTEIDEN SISÄLTÄMIEN MATERIAALIEN HYÖDYNTÄMINEN

Materiaalien erottelu toisistaan on osa urban mining -konseptia, sillä määritelmän mukaan urban mining on yksi tavoista tuottaa raaka-aineita (kuva 1). Samalla tavoin kuin normaalissa kaivostoiminnassa, halutun raaka-aineen erottaminen muusta ei-toivotusta materiaalista on toiminnan kannalta olennaista tai jopa ratkaisevaa (Hartman & Mutmanky 2002). Kun verrataan raaka-ainetuotantovaihetta tavanomaiseen kaivostoimintaan, vertaiset vaiheet olisivat kaivoksen perustaminen ja aktiivinen toiminta. Materiaalien erottelu sijoittuu tässä jaossa osaksi aktiivista toimintaa.

Materiaalien erottelu toisistaan voidaan toteuttaa samanaikaisesti purkamisen kanssa, vasta jätteenkäsittelyn yhteydessä tai, kuten yleensä, näiden jonkin asteisena yhdistelmänä. Tarkastellaan ensin purkamisen vaikutuksia syntyvään materiaalivirtaan ja sen koostumukseen ja sitten syntyneen materiaalivirran muuttamista raaka-aineiksi sekä siihen liittyviä tekniikoita.

### 4.1 Rakenteiden purkaminen ja sen vaikutukset

Rakennuksen tai rakenteen purkaminen voidaan selvästi jakaa kahteen erityyiseen lähestymistapaan, perinteiseen purkamiseen (engl. conventional demolition) ja selektiiviseen purkamiseen (engl. deconstruction tai selective demolition). Lähestymistavoilla on erilaiset vaatimukset ja vaikutuksen niin ajallisesti, teknisesti, taloudellisesti sekä ympäristövaikutusten puolesta. (Coelho & De Brito 2011, 2013a) Lisäksi purkamistavalla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka materiaalivirtoja jatkokäsitellään urban mining -konseptissa.

Perinteisellä purkamisella tarkoitetaan tavallisesti murskauspurkamista, jossa taloudellisuus perustuu yksinkertaisiin työvaiheisiin ja nopeuteen (Coelho & De Brito 2013a). Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa rakennuksen tai rakenteen murskaamista, jolloin muodostuu kuvien 4–7 mukaisia materiaalijakautumia noudattavia materiaalivirtoja. Perinteinen purkaminen voi tapahtua murskaamalla, termisesti, paloittelemalla, räjäyttämällä, sähköisellä prosessilla tai kemiallisella prosessilla (de Brito 1999, Coelho & De Brito 2013a mukaan).

Selektiivisellä purkamisella taas tarkoitetaan purkamista, jossa rakentaminen pyritään teoriassa suorittamaan käänteisessä järjestyksessä (Coelho & De Brito 2013a). Tällöin

materiaalit saadaan eroteltua jo purkamisen yhteydessä ja muodostuvat materiaalivirrat ovat jo valmiiksi puhtaampia kuin perinteisen purkamisen tuottamat materiaalivirrat. Käytännössä tällainen purkaminen on kuitenkin ollut teknisesti ja taloudellisesti epäkäytännöllistä, sillä rakenteet on todella harvoin tarkoitettu purettavaksi (Coelho & De Brito 2013a). Myös kaatopaikkojen alhaiset jätemaksut ovat aikaisemmin suosineet perinteistä purkamista, sillä ei ole ollut taloudellista kannustinta erotella materiaaleja. Tässä on kuitenkin alueellisia eroja ja selektiivinen purkaminen voi olla kannattavaa johtuen sekalaisen rakennusjätteen korkeista vastaanottohinnoista. (Coelho & De Brito 2011, 2013a)

Käytännössä selektiivinen purkaminen toteutuu siten, että purkamisen yhteydessä rakenteista poistetaan eri materiaaleja perustuen taloudellisuuteen, poistamisen helppouteen sekä ympäristövaikutuksiin (Coelho & De Brito 2011, 2013a). Tällaisessa lähestymisessä jäljelle jäävä rakennus puretaan loppuun perinteisen purkamisen menetelmin.

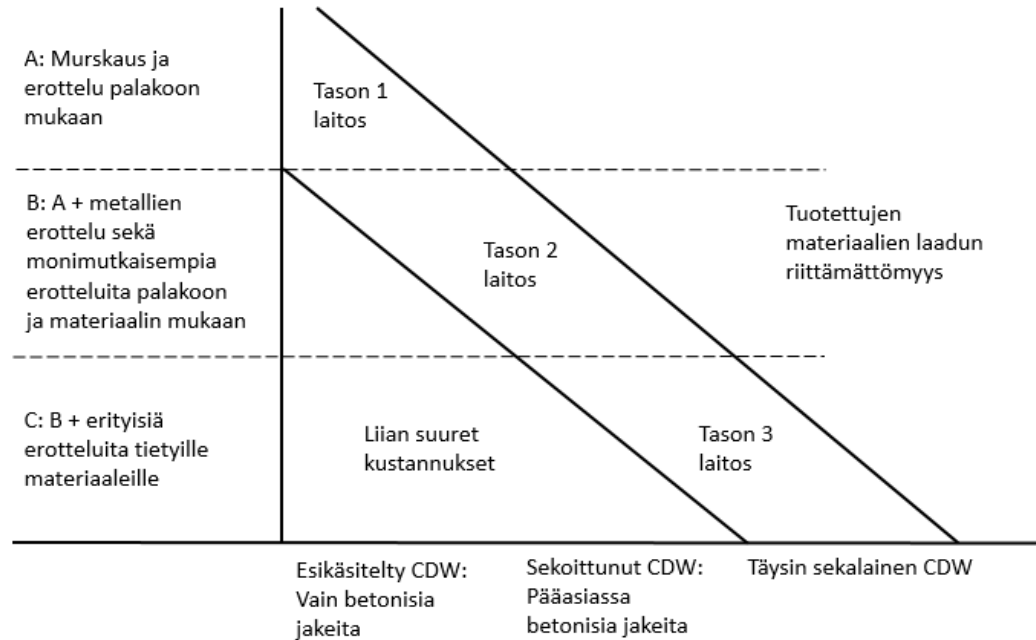
Urban mining -konseptin kannalta olisi tärkeää pyrkiä purkamaan rakenne tai rakennus siten, että materiaalivirran jatkokäsittely olisi mahdollisimman tehokasta. Tällöin purkaminen on jo ensimmäinen osa varsinaista erotteluprosessia.

## 4.2 Purku- ja rakennusjätteen erottelumenetelmät

Erottelun tarkoituksena on eritellä materiaalivirrasta eri tarkoituksiin hyödynnettävät materiaalit ja poistaa mahdolliset epäpuhtaudet eli jakeet, joita ei kyetä hyötykäyttämään ja jotka muuten heikentävät jätevirrasta tuotettavan raaka-aineen laatua (Coelho & De Brito 2013b). Käytännössä materiaalivirran käsittelyyn vaikuttaa huomattavasti se, mihin tarkoitukseen lopputuote eli raaka-aine käytetään. Tämä asettaa laadullisia vaatimuksia sen suhteen, kuinka puhdasta lopputuotteen on oltava erottelun jälkeen. Tässä työssä käsitellään erottelua sellaisen prosessin kautta, jossa pyritään erottamaan mineraalijae, puu ja metallit omiksi materiaalivirroiksi, jotka ovat mahdollisimman puhtaita.

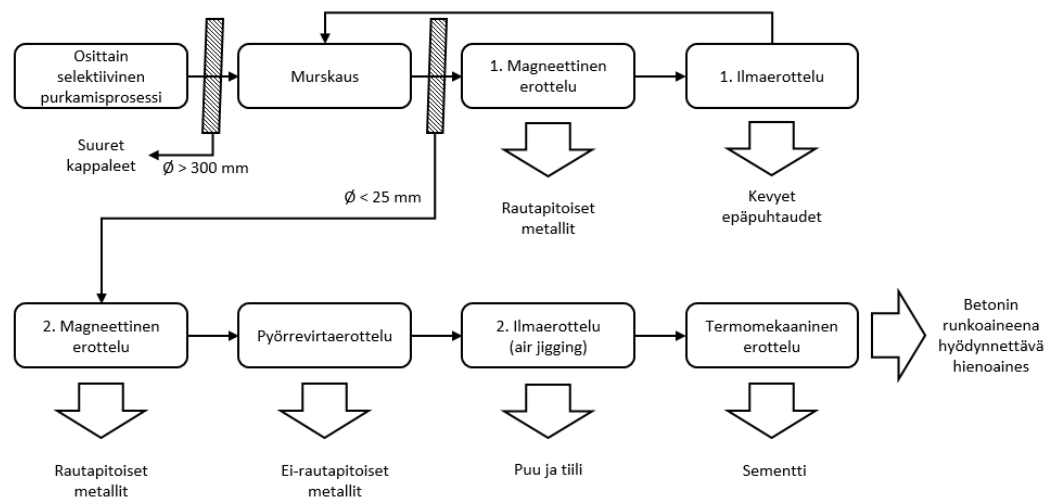
Mineraalijae on selvästi suurin yksittäinen materiaalivirta (kuvat 4-7). Samalla betoni, joka purettaessa sisältyy mineraalijakeeseen, on rakennusmateriaalina selvästi käytetyin (Behera et al. 2014, Meyer 2009). Viime aikoina betoni- ja tiilijätteen hyödyntämistä sementin raaka-aineena on tutkittu runsaasti (Behera et al. 2014, Kesegic et al. 2008). Ongelmia aiheuttaa uusiobetonin mekaanisten ja kestävyysominaisuuksien heikkeneminen verrattuna luonnon raaka-aineista valmistettuun betoniin (Behera et al. 2014, Kesegic et al. 2008, Meyer 2009). Ominaisuuksien heikentymistä aiheuttaa mineraalijakeessakin esiintyvät sementti, kipsi ja asvaltti sekä muut epäpuhtaudet kuten muovi, puu ja kumi (Coelho & De Brito 2013b, Meyer 2009). Urban mining -raaka-ainetuotannon kannalta on tärkeä kyetä erottelemaan betoni- ja tiilijäte mahdollisimman puhtaaksi jakeeksi, jotta niistä valmistettavan uusiobetonin ominaisuudet olisivat

verrattavissa luonnon raaka-aineista valmistettuun betoniin (Coelho & De Brito 2013b). Jotta vaadittavaan puhtausprosenttiin, joka saattaa olla jopa 98 %, päästään, on materiaalien erottelussa käytettävä tason 3 erottelukokonaisuutta (kuva 8).



**Kuva 8.** Kolmitasoinen jaottelu rakennus- ja purkujätteen erottelukokonaisuuksille. Mukailten Symonds Group, Ltd 1999 ja Coelho & De Brito 2013b.

Tason 3 laitokselle on tyypillistä erilaisten erottelumenetelmien yhdistäminen, jolloin on mahdollista saavuttaa todella puhtaita (> 99 %) materiaali-jakeita (Coelho & De Brito 2013b). Koska erilaisia erottelutekniikoita on kehitetty valtavasti, keskitytään seuraavaksi yhteen esimerkkiprosessiin (kuva 9). Prosessin päätarkoituksena on tuottaa betonin raaka-aineeksi kelpaavaa runkoainetta. Lisäksi tavoitteena on erottaa materiaali- ja puumateriaali. Prosessi on pyritty pitämään kuivana, sillä veden käyttäminen esimerkiksi flotaatiossa synnyttää vedenkäsittelyä vaativia vesiä sekä sedimenttiä (Schachermayer et al. 2000, Ambrós et al. 2017). Prosessin runko perustuu Taichungin kaupungissa vuonna 2000 toiminnassa olleeseen laitokseen (Huang et al. 2002), mutta sitä on viety pidemmälle uusien tekniikoiden avulla.



**Kuva 9.** Esimerkki tason 3 erottelukokonaisuuden yksinkertaisesta prosessikaaviosta.

Materiaalivirta syötetään prosessiin osittain selektiivisen purkamisprosessin kautta. Purkamisvaiheessa tärkeimpänä poistettavana materiaalina on kipsilevy, sillä sen poistaminen muissa prosessin osissa on haastavaa, jos muita materiaaleja halutaan hyötykäyttää materiaalina (Ambrós et al. 2017). Myös lasi tulisi poistaa purkamisen yhteydessä, sillä se sekoittuu varsinkin hienoainekseen, jossa se aiheuttaa epäpuhtautta lopputuotteena olevaan betonin runkoaineessa (Huang et al. 2002). Lisäksi teräsbetonirakenteita purettaessa, betonin ja teräksen erotteluun on kiinnitettävä huomiota, jotta kappaleet läpäisevät tankoseulan.

Itse prosessiin syötettävä materiaalivirta kohtaa ensin 300 mm tankoseulan. Seulan tarkoitus on poistaa suuret kappaleet, jotka voisivat vahingoittaa muuta linjaa, ja varmistaa syötettävän materiaalijakeen koon homogeenisuus. Tässä työssä ei tarkastella seulan ylitteen hyödyntämistä vaan oletetaan, että materiaali saadaan syötettyä oikeassa palakoossa prosessiin. Tunnistetaan kuitenkin ongelma, jossa erilaisten elementtien esikäsittely siten, että ne saadaan prosessiin sopivaan palakokoon, voi tuottaa merkittäviä ongelmia. Seulan jälkeen materiaalit murskataan leukamurskaimella (Coelho & De Brito 2013b, Shrivastava & Avadesh 2012). Murskatusta kokonaisjakeesta erotellaan pienikokoinen jae ( $\varnothing < 25 \text{ mm}$ ) rumpuseulalla.

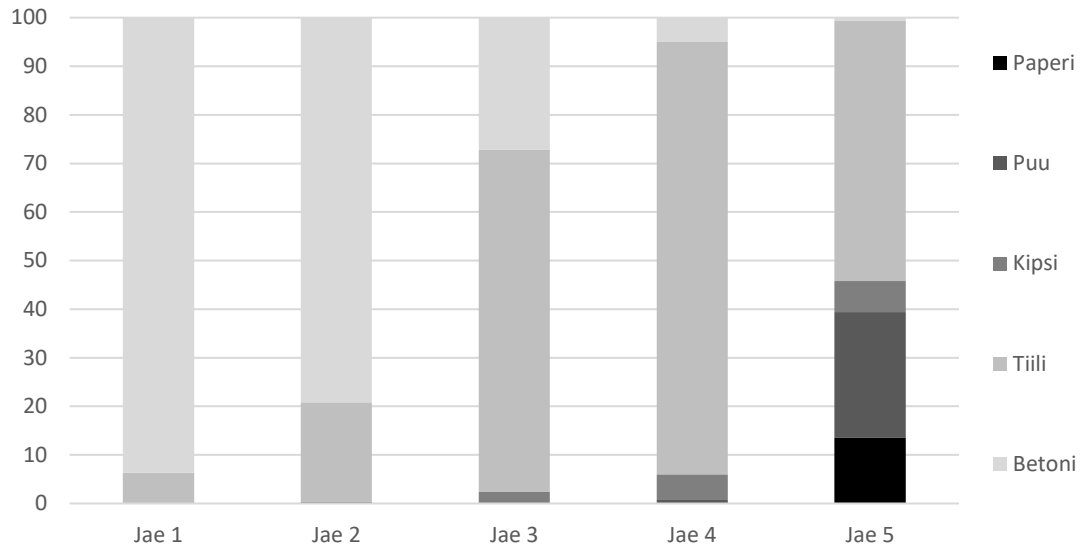
Rumpuseulanylite kulkee kuljetinhihnalla magneettiseen erotteluun, jossa materiaalivirrasta erotetaan irralliset rautapitoiset metallikappaleet. Ongelma magneettisessa erottelussa on se, että rautapitoiset metallit ovat kiinnittyneinä muun muassa puujakeeseen (Manninen et al. 2015). Näin ollen rautaa ei saada erotettua muusta jakeesta, jolloin se aiheuttaa esimerkiksi juuri hyötykäytettävän puujakeen epäpuhtautta ja hyötykäyttö materiaalina vaikeutuu. Tämän vuoksi prosessiin on sijoitettu myös toinen magneettinen erottelu. Kummassakin tapauksessa erottelu on toteutettu kuljetinhihnalla.

yläpuolella kohtisuorasti kulkevalla linjalla (Coelho & De Brito 2013b, Huang et al. 2002). Tällöin magneettinen hihna kulkee kuljetinhihnan yli, ottaen rautapitoiset metallikappaleet mukaansa (Coelho & De Brito 2013b, Huang et al. 2002).

Magneettisen erottelun jälkeen suoritetaan ensimmäinen ilmaerottelu. Sen tarkoituksena on poistaa haluttujen loppujakeiden laatua haittaavia materiaaleja kuten muovia, paperia ja muita kevyitä materiaaleja. Tässä työssä ei käsitellä erotettujen materiaalien hyötykäyttöä. Erottelu perustuu poistettavien kappaleiden massa- ja tiheyteen sekä kappaleen muotoon (Coelho & De Brito 2013b). Tästä syystä pienikokoinen jae ( $\varnothing < 25$  mm) poistetaan ennen tätä erottelua, jotta se ei kevyen massansa takia poistuisi. Ilmaerottelun jälkeen jae palautetaan takaisin murskaimelle, josta se jatkaa rumpuseulalle. Tarkoituksena on saada tuotettua seulan jälkeen pienikokoinen jae, joka sisältäisi enää metallia, puuta, sekä mineraalijäätettä (Huang et al. 2002).

Pienikoisestajakeesta erotellaan ensin rautapitoiset metallit, jotka ovat päässeet seulan läpi, samalla tavalla kuin ensimmäisessäkin magneettisessa erottelussa. Tässä erottelussa saadaan todennäköisemmin eroteltua muussa materiaalissa alun perin kiinni olleet rautapitoiset kappaleet. Magneettisen erottelun jälkeen jakeesta erotetaan muut metallit pyörrevirtaerottelun avulla. Pyörrevirtaerottelu perustuu muuttuvan magneettikentän muodostamaan sähkövirtaan metallikappaleissa (Coelho & De Brito 2013b, Ruan et al. 2014). Sähkövirtapuolestaan saa aikaan magneettikentän, jonka vaikutuksesta kappaleet pyrkivät linjalta pois (Coelho & De Brito 2013b, Ruan et al. 2014). Tällöin haluttavat ei-rautapitoiset metallit saadaan erotettua kuljetinhihna loppuessa, koska ne tippuvat kauemmaksi kuin puu ja mineraalijae (Coelho & De Brito 2013b, Ruan et al. 2014).

Tässä vaiheessa jäljellä oleva jae koostuu lähes kokonaan puusta, betonista, tiilestä sekä laastista. Tämä kokonaisjae voidaan erotella tehokkaasti air jigging -tekniikalla. Aiempaan ilmaerotteluun verrattuna, joka perustui putoamisen loppunopeuteen, air jigging -tekniikka pyrkii saamaan partikkelit jatkuvaan kiihdytys-hidastus-sykliin pulssimaisen ilmavirran avulla (Ambrós et al. 2017). Pulssimainen ilmavirta saavutetaan tuottamalla jatkuva tasainen ilmavirta sekä voimakkaampi hetkittäinen ilmavirta (Coelho & De Brito 2013b, Ambrós et al. 2017). Tällöin lopullisen putoamisnopeuden saavuttaminen estyy, jolloin erottelu tapahtuu pelkästään partikkelien tiheyden perusteella (Ambrós et al. 2017). Näin saadaan eroteltua eri jakeet varsin tehokkaasti, verrattuna muihin mahdollisiin erottelutekniikkoihin (kuva 10).



**Kuva 10.** Betonia, tiiltä, puuta, kipsiä ja paperia sisältänyt kokonaisjake eroteltuna viiteen eri jakeeseen air jigging -tekniikalla. Mukailten Ambrós et al. 2017

Air jigging -tekniikalla voidaan tuottaa hyvinkin puhtaita mineraalijakeita, joita voidaan hyödyntää betonin täyteaineena (kuva 10). Lisäksi, mikäli air jigging -prosessiin syötettävä jake ei sisällä kipsiä tai paperia, saadaan myös puu eroteltua omaksi jakeekseen. Massa suhteita kussakin jakeessa saadaan muokattua säätämällä prosessin tasaisen ilmavirran voimakkuutta ja hetkellisen ilmavirran pulssin tiheyttä (Ambrós et al. 2017). Tällä tavoin prosessi voidaan optimoida tulevalle materiaalijakeelle, jolloin pyritään saamaan kaikki kolme materiaalia betoni, tiili ja puu omina jakeinaan, koska kaikki heikentävät toisestansa hyötykäyttöä materiaalina (Manninen et al. 2015, Behera et al. 2014, Kesegic et al. 2008, Meyer 2009).

Prosessista ulos saatu puu voidaan hyötykäyttää materiaalina esimerkiksi puukomposiitin tai lastulevyn raaka-aineena. Näissä yleensä ongelmana on puujakeen sisältämät mineraalijakeet (Manninen et al. 2015). Air jigging -tekniikalla voidaan kuitenkin tuottaa todella puhtaita puujakeita, jolloin hyötykäyttö materiaalina helpottuu. Prosessista saatua tiilimurskaa voidaan puolestaan käyttää betonin seosaineena, sillä puhtaan tiilimurskan on todettu olevan pozzolaanisesti vahvaa ja omaavan samankaltaiset ominaisuudet kuin tavanomaisessa Portlandin sementissä käytettävällä seosaineella (Lin et al. 2010).

Air jigging -prosessissa kolmas erottuva materiaalijake on betoni. Ennen kuin sitä voidaan hyödyntää uusiobetonin runkoaineena, on siitä poistettava sementti. Samalla erotettu sementti voidaan käyttää Portlandin sementin valmistuksessa raaka-aineena. (Coelho & De Brito 2013b) Sementti on yksi haasteellisimmista materiaaleista erottaa, sillä se on vahvasti kiinni runkoaineessa ja on huomattu, että runkoaineen ominaisuudet voivat heiketä merkittävästi ennen kuin sementti irtaava runkoaineesta. Sementin erottamiseen onkin monia osin kokeellisia prosesseja. Esimerkkiprosessissa sementin erottamiseen on valittu termomekaaninen käsittely, sillä sen on todettu erottavan sementin runkoaineesta

parhaiten, kuitenkin heikentämättä tuotetun runkoaineen ominaisuuksia merkittävästi. Käsittelyssä yhdistetään mekaaninen ja termien käsittely. Ensin sementti pyritään heikentämään joko kuumentamalla tai jäädyttämällä, jonka jälkeen se irrotetaan mekaanisesti runkoaineesta. Tällöin päästään puhtaampiin jakeisiin kuin yksittäisellä käsittelyllä, kuitenkin parhaimmassakin tapauksessa sementtiä jää runkoainekseen vähintään 17 %. (Braymand et al. 2017)

## 5. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä käsiteltiin urban mining -konseptin soveltamista osaksi kaupunkirakenteiden sisältämien materiaalien hyötykäyttöä. Käytännössä tämä tarkoittaa usein purkamisesta syntyvien materiaalien hyödyntämistä. Urban mining on periaatteiltaan tavanomaisen kaivostoiminnan ja kierrättämisen sekoitus, jossa kaivostoiminnalle ominaisesti hyödynnettävä materiaali on varastoitunut ja kierrättämiselle ominaisesti materiaali on ihmistoiminnan synnyttämää. Konseptina urban mining sijoittuu osaksi suurempaa kokonaisuutta, kiertotalousajattelua, jossa tuotteiden arvo pyritään säilyttämään tuotteen elinkaaren jälkeenkin. Tämän perusteella urban mining voidaan helposti sijoittaa osaksi jätteenkäsittelyn etusijajärjestystä, vaikka urban mining -konsepti olisi tulevaisuudessa tärkeä pyrkiä ajattelemaan raaka-aine tuotannonkin näkökulmasta. Kierotalouteen ja sen kehittymiseen korkean urban mining -potentiaali vaikuttaa siten, että korkea potentiaalinen alueella on myös todennäköisempää kiertotalouden toimimiselle, koska materiaaleja on saatavilla.

Alueiden urban mining -potentiaalia voidaan arvioida joko materiaalivirta- tai materiaalivarastoanalyysillä, joista yleisesti materiaalivarastoanalyysi on käytetympi, sillä urban mining keskittyy juuri varastoituneen materiaalin hyödyntämiseen. Tällaiseen analyysiin voidaan myös yhdistää muun muassa paikkatietojärjestelmä ja muita, esimerkiksi ajallisia tietokantoja, jolloin saadaan tietoa myös materiaalien hyödynnettävyydestä sekä hyödyntämisen kannattavuudesta. Kaupunkirakenteiden sisältämät materiaalit noudattavat kohtalaisen samankaltaista koostumusta. Eroja syntyy kuitenkin rakenteiden iän, sijainnin ja käyttötarkoituksen mukaan. Pääasiassa rakenteet koostuvat ei-metallisista mineraaleista kuten betonista ja tiilestä, jotka käsittävät 88–95 % kaikesta materiaalista. Tämän pääjakeen lisäksi tässä työssä tarkasteltiin myös kahden seuraavaksi suurimman jakeen, puun ja metallin, raaka-aineeksi muuttamista. Puu käsittää vaihtelevasti 0–6 % ja metalli 2–9 % kokonaisjakeesta.

Rakenteiden materiaalien hyötykäyttö on usein ongelmallista, sillä rakenteita ei ole suunniteltu purettaviksi. Koska purkaminen suoritetaan yleensä perinteisellä purkamisella, on hyötykäyttö materiaalina ollut vähäistä. Urban mining -konseptissa on lähtökohtaisesti tehokkaampaa materiaalien saannon puolesta suorittaa purkaminen selektiivisenä purkamisena. Itse materiaalien erottelu materiaalivirrasta on myös ongelmallista, sillä metalleja lukuun ottamatta aineita ei pystytty erottelemaan kemiallisen koostumuksen perusteella. Uudet tekniset ratkaisut ja vanhojen kehittyminen muuttavat tällaista raaka-ainetuotantoa yhä kilpailukykyisemmäksi tehostamalla erottelua. Materiaalien hyötykäytön suurin ongelma on materiaalijakeen erottelu siten, että tuotetut raaka-ainejakeet ovat tarpeeksi puhtaita, jotta ne olisivat kilpailukykyisiä neitseellisiin raaka-aineisiin verrattuna. Jotta puhtaisiin jakeisiin päästäisiin, täytyy erotteluprosessien



olla varsin monimutkaisia ja sisältää monia eri yksikköprosesseja. Tällöin saadaan kuitenkin tuotettua varsin puhtaita jakeita. Vaikka nykyään on kehitetty monia erilaisia erottelumenetelmiä ja niistä on varsin paljon tutkimusta, eri erottelumenetelmien yhdistämisestä löytyviä tutkimuksia on vaikea löytää.

## LÄHTEET

Ambrós, W. M., Sampaio, C. H., Cazacliu, B. G., Miltzarek, L. G. & Miranda, L. R. 2017. Usage of air jigging for multi-component separation of construction and demolition waste. *Waste Management*, Vol. 60, pp. 75–83

Arora, R., Paterok, K., Banerjee, A. & Saluja, M.S. 2017. Potential and relevance of urban mining in the context of sustainable cities. *IIMB Management Review*, Vol 29(3), pp. 210–224

Augiseau, V. & Barles, S. 2017. Studying construction materials flows and stock: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 123, pp.153–164

Barles, S. 2009. Urban metabolism of Paris and its region. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 13(6), pp. 898–913

Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R. & Maiti, S. 2014. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete - A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Material Journal*, Vol. 68, pp. 501–516

Birat, J.P., Daigo, I. & Matsuno Y. 2014. Methods to Evaluate Environmental Aspects of Materials. *Treatise on Process Metallurgy*, Vol. 3, pp. 1459–1505

Braymand, S., Roux, S., Fares, H., Déodonne, K. & Feugeas, F. 2017. Separation and Quantification of Attached Mortar in Recycled Concrete Aggregates. *Waste and Biomass Valorization*, Vol. 8(5), pp. 1393–1407

Brunner, P.H. 2011. Urban mining a contribution to reindustrializing the city. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 15(3), pp. 399–341

Brunner, P.H. & Rechberger, H. 2005. *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. eBook Edition. USA 2004, Lewis Publishers, pp. 336

Cheng, K-L., Hsu S-C., Li, W-M. & Ma H-W. 2018. Quantifying potential anthropogenic resources of buildings through hot spot analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 133, pp.10–20

Coelho, A. & De Brito, J. 2011. Economic analysis of conventional versus selective demolition - A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 55(3), pp. 382–392

Coelho, A. & De Brito, J. 2013a. Conventional demolition versus deconstruction techniques in managing construction and demolition waste (CDW). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier Inc., pp. 141–185

Coelho, A. & De Brito, J. 2013b. Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW). *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier Inc., pp. 210–245

Cossu, R. 2013. The Urban Mining concept. *Waste Management*, Vol. 33(3), pp. 497–498

Cossu, R. & Williams, I.D. 2015. Urban Mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, Vol. 45, pp. 1–3

Eurostat. 2001. Economy-wide material flow accounts and derived indicators. A methodological guide. Luxembourg 2001, Office for Official Publications of the European Communities, pp.85

Eurostat. 2010. Guidance on classification of waste according to EWC-Stat categories.

Eurostat. 2017. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2 activity. [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 21.4.2018) <<http://ec.europa.eu/eurostat/web/environment/waste/database>>

Halada, K. & Nakamura, T. 2014. *Urban Mining Systems*. Edition 1. Tokyo 2015, Springer Verlag, pp.50

Hartman, H. & Mutmanský, J. 2002. *Introductory Mining Engineering*. Edition 2. USA 2002, John Wiley & Sons, pp.584

Huang, W., Lin, D., Chang, N. & Lin, K. 2002. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 37(1), pp. 23–37

Kesegic, I., Netinger, I. & Bjegovic, D. 2008. Recycled clay brick as an aggregate for concrete: Overview. *Tehnicki Vjesnik*, Vol. 15(3), pp. 35–40

Kleemann, F., Lederer, J., Rechberger, H. & Fellner, J. 2017. GIS-based Analysis of Vienna's Material Stock in Buildings. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 21(2), pp. 368–380

- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K., Haberl, H. & Fischer-Kowalski, M. 2009. Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, Vol. 68(10), pp. 2696–2705
- Lederer, J., Kleemann, F., Ossberger, M., Rechberger, H. & Fellner, J. 2016. Prospecting and Exploring Anthropogenic Resource Deposits: The Case Study of Vienna's Subway Network. *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 20(6), pp. 1320–1333
- Lin, K., Chen, B., Chiou, C. & Cheng, A. 2010. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement. *Waste Management and Research*, Vol. 28(7), pp. 647–652
- Manninen, K., Judl, J. & Myllymaa, T. 2015. Rakentamisen puujätteiden ja puupakkausjätteiden käsittelyvaihtoehtojen elinkaarenaikaiset ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 29/2015
- Meyer, C. 2009. The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 31(8), pp. 601–605
- Ortlepp, R., Gruhler, K. & Schiller, G. 2016. Material stocks in Germany's non-domestic buildings: a new quantification method. *Building Research and Information*, Vol. 44(8), pp. 840–862
- Ruan, J., Qian, Y. & Xu, Z. 2014. Environment-friendly technology for recovering nonferrous metals from e-waste: Eddy current separation. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 87, pp. 109–116
- Schachermayer, E., Lahner, T. & Brunner, P. H. 2000. Assessment of two different separation techniques for building wastes. *Waste Management and Research*, Vol. 18(1), pp. 16–24
- Shrivastava, A. & Avadesh, S. 2012. A review of study on jaw crusher. *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2(3), pp. 885–888
- Symonds Group, Ltd. 1999. Construction and demolition waste management practices, and their economic impacts. Report to DGXI, European Commission, Final Report, UK.
- Tanikawa, H. & Hashimoto, S. 2009. Urban stock over time: Spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research and Information*, Vol. 37(5-6), pp. 483–502

Wallsten, B., Carlsson, A., Frändegård, P., Krook, J. & Svanström, S. 2013. To prospect an urban mine - Assessing the metal recovery potential of infrastructure cold spots in Norrköping, Sweden. *Journal of Clean Production*, Vol. 55, pp. 103–111

Wouters, H. & Bol, D. 2009. Material scarcity. An M2i study. Delft: Stichting Materials innovation institute.

Wu, Z., Yu, A.T.W., Shen, L. & Liu, G. 2014. Quantifying construction and demolition waste: An analytical review. *Waste Management*, Vol. 34(9), pp. 1683–1692

Ympäristöministeriö. 2017. Etusijajärjestys ohjaa jätehuoltoa [verkkosivu]. Saatavissa (viitattu 15.4.2018) <<http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Jatteet>>